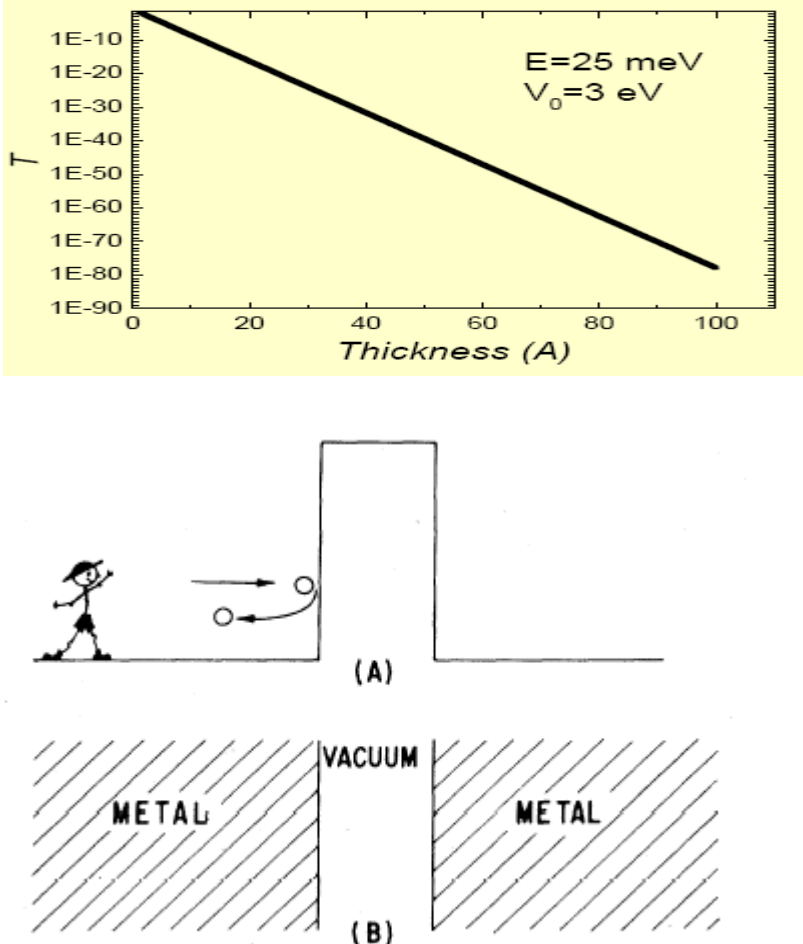




「人與自然」科普寫作桂冠獎

主題：電子的穿牆術	佳作
作者：江品頁	
創作理念： 	

電子的穿牆術

在量子力學中，所預測物質的行為有時候表現較奇怪或是非你能想像時，是不需要太過訝異的，例如網球可以如魔術般穿透一面牆……。

在球場上的某一側，一手握著球拍，另一手準備將球向上拋起，球賽即將開始。網球從手中獲得一向上的初速，離開手心後，藐視空氣對他拉扯，無懼重力對他的吸引，仍堅持耗盡身上所有的能量，只求超越紀錄中的最高點。隨著高度越高向上衝得越慢，在某一瞬間，網球沒力了，他靜止在某一個高度，緊接著的是無奈的開始下墜。還沒來的及蔓延失望，球拍迎面而來，在短暫時間內網球獲得一股向前的極大能量。衝啊！享受著空氣竄流造成摩擦力所發出的嘶嘶聲，得意之下，怎麼已經飛過出界線？在前頭等待的不是另一隻球拍，而是一面高高的牆，懇求空氣多點拉扯是不可能的，地球的吸引力也趕不上讓它像傻子一般的迎頭撞上。這網球只有重重的撞上這面牆，雖然很痛，卻不得不遵守入射角等於反射角，接著再以差不多的速率以一個角度迎向地面……。

球場上的量子力學？

在日常生活中，大家對每天所面對的自然都習以為常。你怎麼從家裡出門到工作地方？你怎麼打完一場精采的球賽？或許你對這背後所依循的規則不是很清楚，但是你會預測從你手中直接被放掉的網球，一定會掉落地而不是往上飛。這也是我們都可以較輕鬆的接受牛頓力學的原因，就像你對你可以看得到的網球分析它的運動方式。但是量子力學呢？

量子力學作用明顯的尺度通常是在奈米以下的等級，導致大部分的人無法感受到在那樣情況下的作用力，甚至將它習以為常。例如我們平常可以感受到物體有多重，因此我們對物體有重量不會感到懷疑；但是如果我說電子有自旋，並且跟你解釋電子是怎麼自旋，你還是可能會抱持著懷疑的態度。當然電子有自旋不是我胡鄒的，而是透過實驗可以真實觀測到的。因此在量子力學中，所預測電子的行為有時候表現較奇怪或是非你能想像時，是不需要太過訝異的。

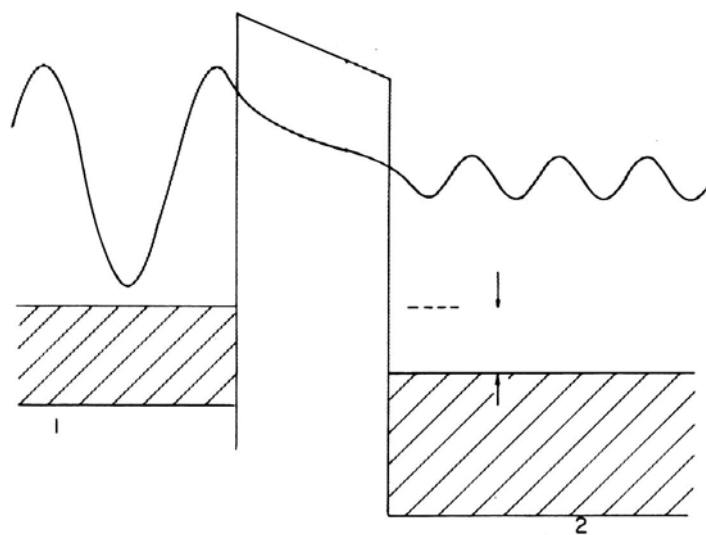
在前面網球的例子中，如果牆壁和網球間的摩擦力夠小，且牆壁夠堅固的話，網球會以相同的能量彈回來，這是我們從古典力學學到的知識。然而量子力學怎麼看待這件事情呢？在量子力學的理論下，將網球丟向牆壁，只要次數夠多，網球終究會毫無損傷的通過牆壁，並且牆壁也毫無損傷。這並不是網球飛躍過牆壁，也不是打穿牆壁，而是網球穿透過牆壁。如果量子力學是正確的，那為什麼我們從來沒有觀察過呢？

網球有質量有體積，也有波動的性質？

討論運動中的網球和上下震盪的水波中，一般認知都覺得網球是實體的物質，我們可以觸摸的到也可以測量它的質量，當它在運動時爲了簡化問題，可稱爲如質點般的粒子；而上下震盪的水波可以傳遞能量，當水波通過或消失時，水又回復原本的平靜無痕，這種上下震盪的行爲稱爲波動。在西元 1923 年，德·布羅伊提出一般物質也存在波動性，也就是運動中的網球也具有類似水波一樣的特性，稱爲波粒二重性。這時你一定大大懷疑，因爲你看到的是一顆網球飛來，而不是一股攜帶能量的波動傳來。那是因爲在人類熟悉的巨觀世界中，物質的波動性所造成的量子力學效應十分不明顯，以致於我們幾乎不可能觀察到網球以波的形式運動。

波，可以穿透障礙物！

西元 1925 年，薛丁格寫下物質波的波動方程式。當行進中的波遇到前方有能量高過此波的障礙時，波動不會就此堵塞停住或甚至用相同的能量反彈。正確來說，由前面水波的例子，我們知道波動即是能量的傳遞，因此波在行進的過程中遇到障礙的邊界時，會有一部分的能量穿透和一部分的能量反彈。而波動穿過此障礙的現象，在量子力學的語言中稱爲穿隧效應，其示意圖如圖一所示。



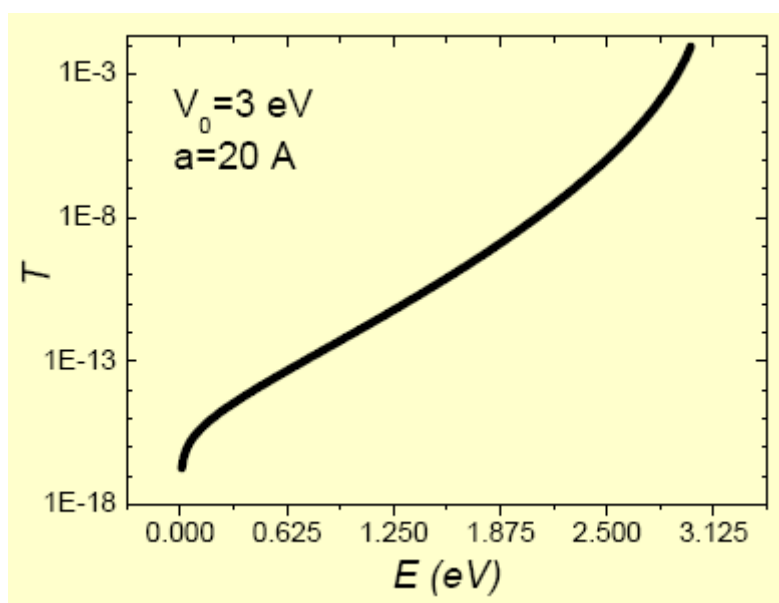
(圖一) 波動通過位能障礙的示意圖。波動在左邊空間中由左向右前進，上下震動的幅度相同，每秒中震動的次數也都維持一定。然而當此波碰到能量高過此波的障礙時，有一部分的能量可以穿透進障礙裡面。波動的振幅在障礙裡面越來越小，直到離開障礙到右邊的空間，才持續以較小的振幅震動。

電子比一般物質有更明顯的波動行爲

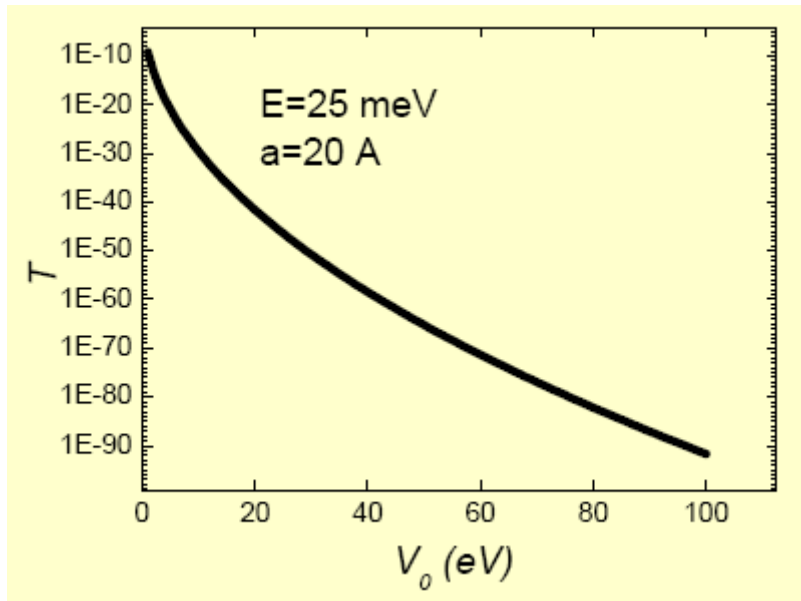
由於一般肉眼可以觀看到的物質，其波動特性十分不明顯，因此發生穿隧效應的機率相當的小，小到幾乎趨近於零。所幸在微觀的世界存在一種較輕容易觀測的物質，而且不需要很難達成的條件就可以取得，這種物質叫做電子。電子的質量為 9.1×10^{-31} 公斤，如果擁有 10 電子伏特的動能，則所展現的物質波波長約為 0.12 埃(1 埃= 10^{-10} 公尺)。我們可以用物質波動的條件，來計算看看電子因為波的特性穿透過障礙物的可能性，即穿隧機率的大小是多少，是否還會像網球一樣趨近於零以致幾乎不可能發生。

容不容易穿透過障礙物，還跟一些條件有關。

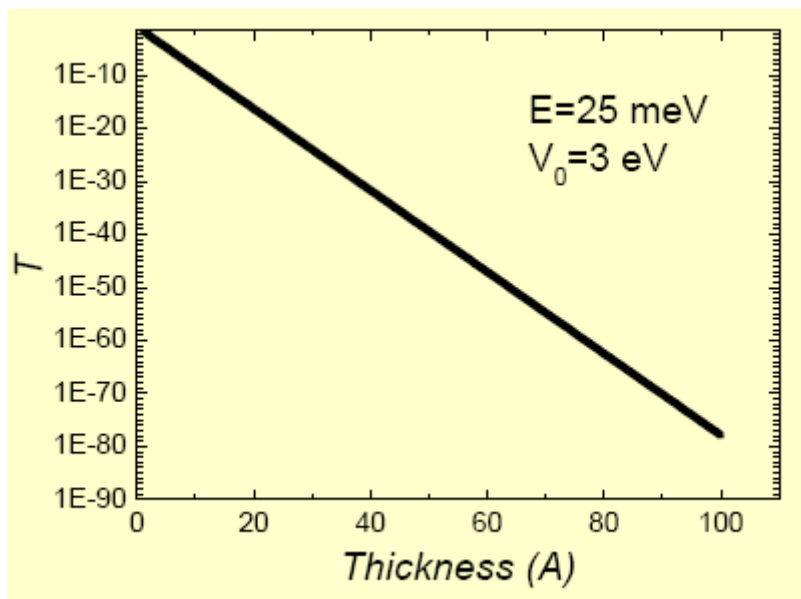
穿隧機率和三個條件有關，分別是電子能量的大小、障礙能量的高低、和障礙的寬度。電子的能量越大(當然不能大於障礙的能量，否則就不叫做穿隧。)，穿隧的機率越高；障礙的能量越高，電子穿隧通過障礙的可能性會下降；障礙實際上的厚度越寬，穿隧機率也會下降。繪製成曲線圖形的結果，如圖二、圖三、圖四所示。在圖二中，當電子能量接近障礙能量(3 電子伏特)時，穿隧機率接近 0.001！意味著當 1000 顆電子遇到此障礙，有一顆電子就可以發生穿隧效應。這樣的機率很小嗎？老實說一點也不！因為在很短的時間如一秒內，要讓幾萬顆甚至上千萬顆電子流到這個障礙前，並不是一件困難的事情，也就是說，如果穿隧效應是正確的話，這將不會是無法觀察到的現象。



(圖二) 固定障礙的能量 V_0 為 3 電子伏特，障礙的寬度 a 為 20 埃，則電子能量 E 越大，穿隧機率 T 越高。當電子能量 E 接近障礙能量 V_0 (3 電子伏特)時，穿隧機率 T 接近 0.001。[$1E-3=10^{-3}$]



(圖三) 固定電子的動能 E 為 25 毫電子伏特，障礙的寬度 a 為 20 埃，則障礙的能量 V_0 越大，電子越不容易發生穿隧效應。

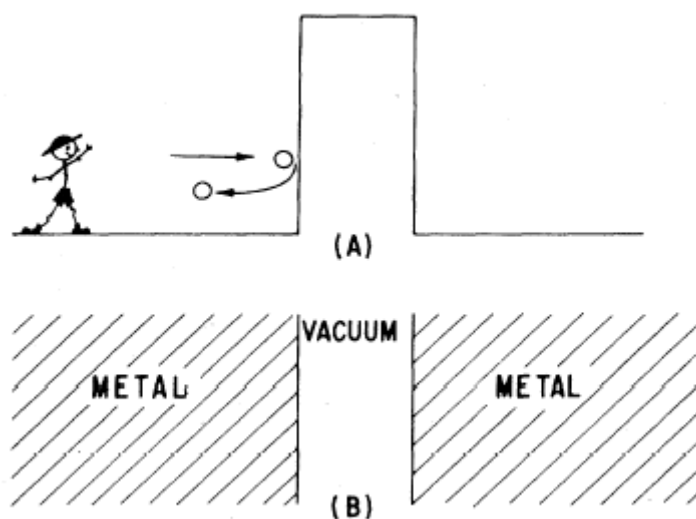


(圖四) 固定電子的能量 E 為 25 毫電子伏特，障礙的能量 V_0 為 3 電子伏特，則隨著障礙的厚度 a 增加，電子越不容易發生穿隧效應。[圖二、圖三和圖四皆出自交通大學博士後研究員 葉勝玄博士]

要如何觀察到電子穿透牆壁？

一直到接近西元 1960 年，才開始有人設法觀察電子的穿隧現象。為什麼從西元 1925 年物質的波動方程式被寫下來，就可以估算電子穿隧機率並非趨近於

零，卻沒有人實際展開觀測行動呢？你應該還有印象剛剛我們所估算的障礙寬度約為 30 埃，而要怎麼樣做出比頭髮寬度還要窄上萬倍的一面牆？這或許就是遲遲沒有人動手的原因，因為這不是一件容易的事情。Ivar Giaever 是一個工程出身的人，在當時他到研究所修習量子力學，學到粒子可以穿越位能障礙的概念，他認為是如此的不可思議。因此他構想了一個粗略的簡圖，將兩塊平行金屬板間隔數十埃，中間的真空部分就相當於位能障礙，如圖五所示。電子在金屬裡面可以自由的移動，當它運動到金屬和空氣的交界處時，古典物理告訴我們電子不會繼續前進，因為真空是不導電的；但是量子力學認為很多電子碰到真空，總有幾個會穿透真空到另一個金屬板上。電子從一金屬板穿隧移動到另一金屬板，即產生電流，電流則是我們所能測量的物理量。

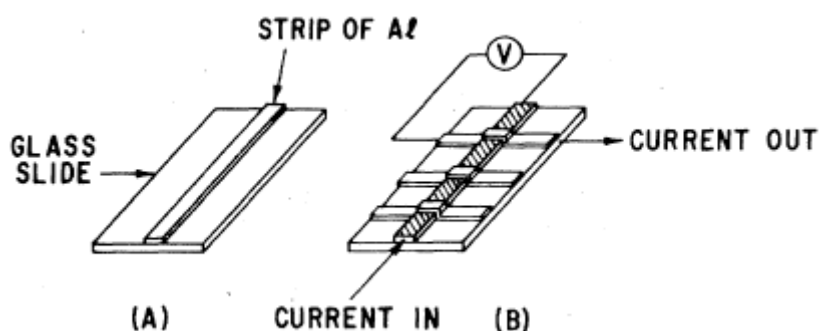


(圖五) 將網球丟向牆壁和電子通過位能障礙做比喻。(A) 如果有人向牆壁丟一顆網球，則網球會彈回來。而量子力學的定律允許網球可以穿透或穿隧牆壁，但因為網球是巨觀的物質，所以機率趨近無限小。(B) 兩片金屬由真空分開近似於如上的情況，電子在金屬中相當於”網球”，而真空意味著”牆壁”。

電子真的像波一樣穿透一面牆！

用兩金屬板間隔真空作為觀測穿隧效應的方法，理想上似乎可行。然而將兩片金屬相間隔數十埃本來就是不容易的事情，光是震動就可能導致兩金屬因接觸而造成短路。經過多番的嘗試，Ivar Giaever 最後選用蒸鍍鋁和氧化的方法，成功的觀測穿隧效應。將鋁加熱使其揮發，散佈在密閉空間中部分的鋁會沾黏到預先擺放好的玻璃上，並且可以控制鋁在玻璃上的圖形，此種方法稱為蒸鍍；如圖六(A)

所示，可看到在玻璃上形成一條帶狀的鋁薄膜。再將鋁拿到空氣中，而鋁的特性會在表面形成緻密的氧化層，氧化鋁是絕緣不導電的物質，就可取代真空，相當於網球例子中的牆壁。接著，將曝大氣的樣品再次蒸鍍鋁，只是這次蒸鍍的圖形和上一次蒸鍍的圖形交錯，如圖六(B)所示。則兩個金屬看上去重疊的部分，就是底層金屬、中間絕緣層、最上層是金屬的結構。適當的接上電源、電壓計、安培計，就可以量測到因穿隧效應所產生的穿隧電流。而 Ivar Giaever 也因為觀測到穿隧電流，獲得西元 1973 年的諾貝爾物理獎。



(圖六) (A) 鋁藉由蒸氣沉積成帶狀圖形並位於玻璃片的中央。接著，鋁的薄膜立即被暴露在空氣中，保護性的絕緣氧化層形成於表面。而決定氧化層的因素，包括溫度和溼度。(b)適當的氧化層形成後，將鋁交錯的蒸鍍在同一批樣品上，兩層金屬薄膜就像三明治一樣將氧化層夾在中間。電流經由其中一層鋁的薄膜穿隧通過氧化層，再由另一層鋁的薄膜流出。

這是如此的令人感到驚奇！物質不再只是物質，而過去的牛頓力學也不再能完整的解釋物質的運動現象。當然，科學的不斷進步，哪天也許會出現更完整的理論來修正量子力學，人類所能發現自然的運行規則就更加深入也更加基本。唯有寬廣客觀的態度，才能朝向科學的真理。

參考文獻：

1. Robert Eisberg and Robert Resnick, Quantum Physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles.
2. The lecture was delivered by Ivar Giaever on the occasion of his receiving the 1973 Nobel Prize in Physics.